АННОТАЦИЯ
к диссертационной работе (серия статей) на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05306 – Физика»

СУЛИЕВА ГУЛЬНАРА

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИЙ ПОЛЯ К АСТРОФИЗИЧЕСКИМ ЗАДАЧАМ

Общая характеристика работы

Современные направления в гравитационной физике предполагают активное использование теорий поля для явлений, описание которых выходит за рамки классической общей теории относительности (ОТО). В этом контексте интересны модели, в которых гравитация взаимодействует с дополнительными скалярными и векторными полями, поскольку такие конфигурации позволяют описывать более широкий класс астрофизических объектов.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию гравитационных эффектов, возникающих в результате включения дополнительных полей в структуру пространства-времени, и их применению к конкретным задачам современной астрофизики. Основное внимание уделено анализу движения пробных частиц и фотонов вблизи чёрных дыр (ЧД), а также исследованию отклонений от предсказаний ОТО. Работа направлена на выявление таких отклонений, которые потенциально могут быть проверены с использованием существующих наблюдательных инструментов.

Рассмотрены следующие модели:

- *Регулярные модели ЧД, полученные из нелинейной электродинамики – ЧД Фань-Вана и Дымниковой.* Для решения Фань-Вана исследуется геодезическое движение массивных и безмассовых частиц, а также фотонов в эффективной геометрии. Анализируются смещение перигелия, отклонение безмассовых частиц и фотонов. Кроме того, с использованием формализма тонкого аккреционного диска Новикова-Торна изучаются радиационные свойства аккреционных дисков как в метрике Фань-Вана, так и в метрике Дымниковой: распределение потока излучения, температура, дифференциальная и спектральная светимости, а также эффективность преобразования массы в излучение.

- *Дилатонные чёрные дыры с двумя скалярными и двумя векторными полями*. Изучены круговые геодезические траектории массивных частиц. Найдены эффективные потенциалы, энергия и угловой момент орбит, определены радиусы наименьших устойчивых круговых орбит (ISCO). Установлена зависимость приведенных физических характеристик от параметра связи дилатонного поля и электрических зарядов.

Таким образом, работа демонстрирует методы для сопоставления различных теорий поля с классической ОТО на примере вышеуказанных моделей ЧД. Также показано, что модификации, обусловленные наличием топологических, магнитного и электрического, зарядов и параметром дилатонного взаимодействия, проявляются в астрофизически значимых наблюдаемых эффектах. Используемый подход сочетает точные аналитические и численные решения для уравнений движения с

решениями, полученными с использованием метода возмущений. Это позволяет связывать результаты с явлениями, наблюдаемыми в аккреционных дисках, динамике звёзд, движущихся около ЧД, гравитационном линзировании и высокоэнергетических процессах.

Актуальность темы

Актуальность диссертационной работы определяется современным этапом развития астрофизики, в котором наблюдения с хорошей точностью позволяют проверять фундаментальные теории гравитации в сильных и слабых полях. Современные инструменты, такие как интерферометры гравитационных волн (LIGO, VIRGO, KAGRA), проект Event Horizon Telescope, а также спектроскопические наблюдения орбит звёзд, открывают возможности для исследования природы компактных объектов. Так, были зафиксированы слияния ЧД и нейтронных звёзд и получены изображения тени сверхмассивных ЧД в центрах галактик M87 и Млечный путь.

Классические решения для ЧД (Шварцшильда, Рейсснера-Нордстрёма, Керра) во многих случаях успешно описывают наблюдения, однако обладают рядом принципиальных проблем, таких как наличие сингулярностей. Регулярные модели ЧД, Фань-Вана и Дымниковой, на основе нелинейной электродинамики позволяют избежать сингулярности и при этом сохраняют асимптотическую согласованность с ОТО. Дилатонные решения естественным образом возникают в теориях струн, где важную роль играют скалярные и калибровочные поля. В рамках каждого решения вводятся физические параметры (топологические магнитные и электрические заряды, параметры дилатонного взаимодействия).

Следует отметить, что сопоставление с наблюдательными данными позволяет ставить ограничения на параметры моделей ЧД.

В связи с этим исследование, направленное на получение решений для уравнений движения, устойчивости и смещения орбит, распространения света, имеет как фундаментальную, так и прикладную значимость. Оно вносит вклад в задачу различия между классическими и альтернативными моделями ЧД и показывает, каким образом данные модели могут быть связаны с реальными астрофизическими объектами.

Цель исследования

Теоретический анализ гравитационных эффектов в моделях ЧД, построенных с учётом дополнительных полей (нелинейного электромагнитного и дилатонного полей).

Объекты исследования

Черные дыры, нелинейное электромагнитное поле, дилатонное поле.

Предмет исследования

Движение пробных частиц и фотонов, гравитационные эффекты (смещение перигелия, отклонение света), аккреционные диски.

Методы исследования

В работе были использованы следующие методы:

- Аналитические и численные решения уравнений движения;
- Методы дифференциальной геометрии и тензорного анализа;
- Формализм Лагранжа и методы возмущений;

- Численное моделирование.

Задачи исследования

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать классические эффекты общей теории относительности в пространстве-времени, описываемом регулярной ЧД Фань-Вана;

2. Изучить радиационные свойства аккреционных дисков вокруг регулярных ЧД Фань-Вана и Дымниковой;

3. Проанализировать круговые орбиты в пространстве-времени дилатонной ЧД с двумя скалярными и двумя векторными полями.

Научная новизна и основные результаты

В данной работе впервые:

- Для пространства-времени Фань-Вана получены аналитические выражения для смещения перигелия и отклонения безмассовых частиц и фотонов. Показано, что нелинейная электродинамика вносит поправки к результатам метрики Шварцшильда, которые потенциально могут быть отличимы с помощью наблюдений.

- Для ЧД Фань-Вана и Дымниковой были рассчитаны поток излучения, температура, светимость и эффективность преобразования массы в излучение аккреционных дисков. Показано, что при ненулевых параметрах электрического и магнитного зарядов ISCO смещается ближе к горизонту, что приводит к более высокой температуре поверхности диска и повышению эффективности преобразования массы в излучение по сравнению с ЧД Шварцшильда.

- Для дилатонных ЧД найдены решения для круговых геодезических орбит массивных частиц. Установлена зависимость радиуса ISCO, энергии и углового момента орбит от параметра взаимодействия и зарядов, выявлены отличия от решений Шварцшильда и Рейсснера–Нордстрёма.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В модели регулярной черной дыры Фань-Вана эффекты нелинейной электродинамики приводят к ослаблению гравитационных явлений, включая смещение перигелия, отклонение фотонов и безмассовых частиц, по мере увеличения топологического магнитного заряда. Прямое применение данных наблюдений для смещения перигелия звезды S2, вращающейся вокруг Sagittarius A*, позволяет ограничить магнитный заряд величиной $l \approx 4.34 * 10^{-11}$ Вб.

2. Аккреционные диски вокруг регулярных черных дыр Фань-Вана и Дымниковой характеризуются более высокой спектральной светимостью, нежели вокруг черной дыры Шварцшильда. Эффективность преобразования массы в излучение достигает 11.43% (Фань-Ван) и 8.7% (Дымникова), что превышает значение для черной дыры Шварцшильда в 2 и 1.5 раза соответственно. В двойной системе Cygnus-X1 максимально возможная температура поверхности диска составляет: $6.7 * 10^6$ К (Фань-Ван) и $5.45 * 10^6$ К (Дымникова), превышающие значение для черной дыры Шварцшильда в 1.75 и 1.43 раза соответственно.

3. Для дилатонных черных дыр радиус ближайшей к центру устойчивой орбиты и эффективность преобразования массы в излучение, монотонно возрастают с ростом параметра дилатонного взаимодействия a, причём решения

Шварцшильда $(a = a_{min} = 0)$, Сена $(a = 1)$, и Рейсснера-Нордстрёма $(a = a_{max} = 2)$ естественным образом возникают как предельные случаи теории.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость работы заключается в развитии физики ЧД в рамках моделей, учитывающих дополнительные поля. Практическая значимость связана с возможностью применения полученных результатов для моделирования процессов в окрестности компактных объектов — излучения аккреционных дисков, гравитационного линзирования, орбитальной динамики звёзд. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для ограничения параметров альтернативных моделей ЧД по данным наблюдений в реальных астрофизических системах.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Результаты и выводы исследования подтверждаются публикациями в рецензируемых международных и отечественных научных изданиях. Достоверность результатов подтверждается их согласованностью с современными теоретическими моделями, с наблюдательными данными, с выводами о природе аналогичных физических объектов, а также с результатами исследований, проведённых другими авторами.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в выборе методов исследования совместно с научными консультантами. Проведены численные расчёты и анализ полученных результатов, сформулированы выводы. Результаты работы были представлены автором на международных научных конференциях, а также подготовлены к публикации в рецензируемых научных изданиях.

Публикации

Основные результаты, содержащиеся в работе, были опубликованы в 9 научных работах, из них:

Статьи с высоким импакт-фактором, опубликованные в изданиях, входящих в международные научные базы данных Thomson Reuters и Scopus:

1. Boshkayev K., **Suliyeva G.,** Ivashchuk V., Urazalina A. Circular geodesics in the field of double-charged dilatonic black holes //The European Physical Journal C. – 2024. – Т. 84. – №. 1. – С. 19. (**WoS:** Impact Factor – 4.8, Q2. **Scopus:** 91%).
2. Mychelkin E., Makukov M., **Suliyeva G.,** Jafari N. On the weak and strong field effects in antiscalar background //General Relativity and Gravitation. – 2024. – Т. 56. – №. 4. – С. 44. (**WoS:** Impact Factor – 2.8, Q2. **Scopus:** 73%).
3. Kurmanov Y., Boshkayev K., Konysbayev T., Luongo O., Saiyp N., Urazalina A., Ikhsan G., **Suliyeva G.** Accretion disks properties around regular black hole solutions obtained from non-linear electrodynamics // Physics of the Dark Universe. – 2024. – Т. 46. – С. 101566. (**WoS:** Impact Factor – 6.4, Q1. **Scopus:** 84%).
4. **Suliyeva G.,** Boshkayev K., Konysbayev T., Kurmanov Y., Luongo O., Muccino M., Quevedo H., Urazalina A., Dalelkhankyzy A. Geometric properties versus particle motion in the Fan-Wang spacetime // Chinese Journal of Physics. – 2025.– Т. 96. – С. 1065. (**WoS:** Impact Factor – 4.6, Q1. **Scopus:** 85%).

Статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

1. Kurmanov Y., Boshkayev K., Konysbayev T., Muccino M., Urazalina A., Ikhsan G., Saiyp N., Rabigulova G., Karlinova M., **Suliyeva G.,** Taukenova A., Beissen N. Analysis of dark matter profiles in the halos of spiral galaxies // Physical Sciences and Technology. – 2023. – Т. 10. – №. 3-4. – С. 4-16.
2. **Suliyeva G.,** Kurmanov Y., Konysbayev T., Boshkayev K., Urazalina A., Luongo O. Finite temperature effects within Scalar Field Dark Matter model // Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – Т. 21. – №. 2. – С. 92-101.
3. Kurmanov Y., Konysbayev T., **Suliyeva G.,** Ikhsan G., Saiyp N., Rabigulova G, Urazalina A. Radiative characteristics of accretion disks around rotating regular black holes // International Journal of Mathematics and Physics. – 2024. – Т. 15. – №. 1. – С. 57-67.
4. **Сулиева Г.**, Мычелкин Э., Макуков М. Два типа визуализации скалярного поля //Доклады НАН РК. – 2025. – Т. 2. – С. 79-93.

Публикации в материалах международных и отечественных научных конференций:

1. Suliyeva G.B. Circular geodesics in the field of double-charged dilatonic black holes // International Scientific Conference of students and young scientists “Farabi Alemi” of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty – 2023. P. 29.

Апробация работы

Результаты, полученные в данной работе, были докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры теоретической и ядерной физики КазНУ им. аль-Фараби;
- на международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі», г. Алматы, 6-8 апреля 2023 г.;
- на международной конференции «Abdildin Readings. Actual Problems of Modern Physics», г. Алматы, 12-15 апреля 2023 г.;
- на международной конференции «New Trends in Theoretical Physics», г. Ташкент, 23-28 октября 2023 г.;
- на международной конференции «International Conference on Theoretical Physics and Astrophysics», г. Ташкент, 13-18 мая 2024 г.

Связь темы исследовательской работы с планами научных работ

Исследовательская работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан «Грантовое финансирование научных исследований» по теме: «AP19680128 Движения пробных частиц и фотонов в гравитационном поле дилатонных черных дыр».